

# 沿黄城市生态保护与高质量发展的耦合协调性分析与预测

康艳青, 刘羽晴, 朱永明

(郑州大学 管理工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 构建经济与生态综合评价指标体系, 采用耦合协调度模型及地理探测器探究了2011—2018年沿黄城市耦合协调度发展的时空演变及影响因素, 并运用灰色GM(1, 1)模型对耦合协调度进行预测。结果表明: (1) 2011—2018年, 沿黄地区生态与经济发展水平平均呈增长趋势, 下游经济高质量发展水平高于中上游地区, 而在生态环境保护方面, 上游表现最为良好。(2) 经济与生态二者发展水平等级对应程度较弱, 存在时空上的差异性, 耦合协调度呈现先上升后下降的发展趋势, 流域整体处于中度协调水平。(3) 耦合协调水平受多种影响因素共同作用, 作用程度存在一定的地域性和差异性。(4) 从预测结果来看, 耦合协调发展水平在短期内保持平稳上升趋势, 但总体提升与演进的速度较为缓慢, 处于中、高度协调过渡阶段, 存在较大的提升空间。

**关键词:** 黄河沿线城市; 高质量发展; 耦合协调度; 地理探测器; 驱动因素

**中图分类号:** X196; F062.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4407(2022)10-190-08

## Analysis and Prediction of Coupling Coordination between Ecological Protection and High-Quality Development in Cities along the Yellow River

KANG Yanqing, LIU Yuqing, ZHU Yongming

(School of Management Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou Henan 450001, China)

**Abstract:** The comprehensive evaluation index system of economy and ecology is constructed, and the coupling coordination model and geographic detector are used to explore the temporal and spatial pattern evolution and influencing factors of the coupling coordination degree development of cities along the Yellow River from 2011 to 2018. Finally, the grey GM(1, 1) model is used to predict the coupling coordination degree of the watershed. The results indicate: (1) From 2011 to 2018, the ecological and economic development level of the areas along the Yellow River showed an increasing trend. Specifically, the high-quality economic development level of the lower reaches was higher than that of the middle and upper reaches, while the upper reaches performed the best in terms of ecological and environmental protection. (2) The corresponding degree of economic and ecological development levels is weak, there are temporal and spatial differences, the coupling coordination degree shows a development trend of first rising and then falling, and the whole basin is at a moderate coordination level. (3) The level of coupling coordination is affected by many factors, and the degree of influence is regional and different. (4) From the prediction results, the development level of coupling and coordination maintains a stable upward trend in the short term, but the overall improvement and evolution speed is relatively slow, which is in the transition stage of medium and high coordination, and there is a large room for improvement.

**Key words:** cities along the Yellow River; high quality development; coupling and coordination degree; geographic detectors; driving factors

黄河流域是我国重要的生态屏障和经济地带, 在国家高质量发展格局中有着举足轻重的地位<sup>[1]</sup>。2021年3月, “十四五规划”提出要扎实推动各区域发展建设, 加快建设黄河流域生态保护和高质量发展先行区。黄河在迎来重大发展机遇的同时, 仍面临着生态本底脆弱、水

资源匮乏、环境超载等亟待解决的问题, 存在着经济发展规模和资源环境承载力不匹配等矛盾。为解决瓶颈问题, 必须立足整体, 从经济—生态保护系统的协同性出发, 实现黄河流域经济与生态的协调发展, 这是流域可持续发展的根本目标和必然选择<sup>[2]</sup>。

**基金项目:** 河南省哲学社会科学规划年度项目“黄河流域生态补偿长效机制与路径研究”(2020CJJ099); 中国工程院重大咨询研究项目“黄河流域绿色高质量发展的产业结构优化与城市发展战略”(2020-ZD-18-5)

**第一作者简介:** 康艳青, 博士, 研究方向为生态经济。E-mail: kang4006@126.com

**通讯作者简介:** 朱永明, 博士, 教授, 研究方向为社会责任、生态环境治理。E-mail: z502116@126.com

研究生态保护和经济发展的耦合协调度，可以对二者的协调程度做出定量的判断，进而科学的评判区域发展模式是否合理，为实现当地可持续发展提供政策建议。学术界对此做了很多相关研究，Grossman & Krueger<sup>[3]</sup>提出了环境库兹涅茨曲线(EKC)理论，经济合作与开发组织(OECD)将脱钩理论的概念扩展到生态环境与经济上面，阐释了经济发展与环境消耗的内在联系<sup>[4]</sup>。黄金川和方创琳<sup>[5]</sup>先后提出城市化与生态环境交互耦合机制、耦合效应解析的理论框架及技术路径<sup>[6]</sup>与“耦合魔方”概念<sup>[7]</sup>等，极大地丰富和推进了该领域的理论研究。从研究方法来看，生态足迹<sup>[8-9]</sup>、系统动力学模型<sup>[10]</sup>、共生模型<sup>[11]</sup>和障碍度模型<sup>[12]</sup>等被广泛运用到耦合分析中。具体到黄河流域，在其生态保护与高质量发展上升为国家战略后，引起了不少学者的研究与关注。薛澜等<sup>[13]</sup>从国家和区域层面阐述了此战略实施的必要性和重要性，从系统整体性、协同适应性出发，提出了实施此战略的立法策略，任保平和张倩<sup>[14]</sup>剖析了其时代内涵和主要特征，构建了战略支撑体系，杨永春等<sup>[15]</sup>论述了战略实施的基本条件和核心策略。也有学者对黄河流域的高质量发展进行了路径探讨<sup>[16]</sup>、动态演进及趋势预测研究<sup>[17]</sup>。在研究尺度上，学者们分别从不同河段、区域与支流进行论证，例如宗鑫等<sup>[18]</sup>运用博弈模型对流域上游进行生态补偿主体的复制动态研究，并分析了其进化稳定策略，赵雪雁等<sup>[19]</sup>分析了中游地区的城镇化与生态系统服务的耦合关系，刘建华等<sup>[20]</sup>评估了下游的经济、人口、资源和环境的和谐发展水平，岳强和翟鹏芳<sup>[21]</sup>、徐瑞璠等<sup>[22]</sup>分别对汾河、渭河等支流及沿线地区进行实证研究。少数学者也对黄河流域的水资源利用效率<sup>[23]</sup>以及环境—经济—人口系统耦合的协调度<sup>[24]</sup>进行了综合评价。

总体而言，上述关于黄河流域高质量发展的研究大多是从省域、城市群或其他特殊区域展开，对沿黄地级市的探讨涉及较少，且对协调发展的影响因素研究较为薄弱。基于此，本文以沿黄46个地级市为研究对象，利用耦合协调度模型，对2011—2018年黄河流域沿线城市的经济与生态发展的耦合关系进行研究。其次，运用地理探测器分析影响耦合协调水平的多重因素和作用程度，最后利用灰色GM(1, 1)模型对耦合协调度进行预测，以期客观反映黄河流域高质量协调发展的影响机制与发展趋势，从而深入剖析其高质量发展中存在的主要问题，为黄河流域的高质量发展和可持续发展提供参考。

## 1 研究区域概况

黄河是中华民族的母亲河，西起巴颜喀拉山，东临

渤海，横跨东中西共九省份，流域总面积79.5万平方千米。流域内包含草原、荒漠、湖泊、湿地等多种生态类型，煤炭、石油、天然气等能源资源丰富，是我国重要的能源与化工原料基地。这些构成了流域经济发展和生态平衡的重要基础，使得黄河流域在我国生态安全、能源保障和经济发展格局中占据关键地位。但是由于历史与自然条件以及工业化、城镇化的快速发展，使得流域内人地矛盾较为突出，严重制约了黄河流域的高质量发展。流域内的生态问题具有区域差异性，复杂的自然资源条件塑造了黄河流域社会经济的基本特征。流域上下游之间的经济发展差异也较大，发展不平衡不充分，下游地区经济发展水平较高，上游的产业结构转型升级速度迟缓，内生动力不足。为了实现黄河安澜与高质量发展，黄河流域生态保护和高质量发展上升成国家重大战略。

## 2 研究方法与数据来源

### 2.1 指标体系构建与数据来源

遵循指标选取的可靠性、科学性等原则，借鉴前人研究经验，本文构建了一个关于经济和生态环境的综合评价体系(表1)。参考张军扩等<sup>[25]</sup>提出的高效、公平和可持续的高质量发展的目标要求，从经济和社会发展可持续的两个维度出发，构建了涵盖五大新发展理念的共九个指标来评价经济高质量发展水平。其中：人均地区生产总值反映的是城市自身经济发展水平及发达程度，是经济高质量发展的基础支撑；非农业产值占比反映的是结构优化情况；科技支出占GDP比重是指科技投入与创新水平，为发展提供动力；进出口总额占GDP比重反映对外贸易的情况，是高质量发展的外部支撑；城乡收入差距衡量的是经济高质量发展的协调性；建成区绿化覆盖率、人均公园绿地面积反映城市绿化水平以及环境保护的基本水平；城镇基本养老参保人数、城镇医疗参保人数反映了社会的基本保障能力。其次，参考石涛<sup>[26]</sup>、崔盼盼<sup>[27]</sup>等的生态环境保护指标，结合本文研究内容，从污染综合治理和水资源可持续的两个维度共五个指标来评价生态环境保护水平。其中，工业废水与二氧化硫排放量反映资源消耗和污染排放对环境的影响程度，生活垃圾无害化处理率、污水处理厂集中处理率和人均居民生活用水量是衡量的是资源环境保护能力。依据指标数据的可得性、连续性原则，以及黄河流域流经地区现状，本文选择黄河流域沿线46个城市为研究对象，文中分析数据均来自2012—2019年的《中国城市统计年鉴》以及相应省份统计年鉴。

表 1 沿黄地区生态保护与高质量发展指标体系

一级指标	二级指标	变量	单位	属性
经济高质量发展(ED)	经济发展可持续	1 人均地区生产总值	元	+
		2 非农业产值占比	%	+
		3 科技支出占 GDP 比重	%	+
		4 进出口总额占 GDP 比重	%	+
		5 城乡收入差距	—	-
	社会发展可持续	6 建成区绿化覆盖率	%	+
		7 人均公园绿地面积	m <sup>2</sup>	+
		8 城镇基本养老保险参保人数 / 常住人口	%	+
		9 城镇医疗参保人数 / 常住人口	%	+
生态环境保护(EP)	污染综合治理能力	10 工业废水排放量	万吨	-
		11 工业二氧化硫排放量	吨	-
		12 生活垃圾无害化处理率	%	+
	水资源可持续能力	13 人均居民生活用水量	吨	-
		14 污水处理厂集中处理率	%	+

## 2.2 研究方法

### 2.2.1 耦合协调度模型

熵可以反映指标的离散程度,从而确定指标在综合评价系统中的影响权重。可以减少主观赋权的随意性,提高精确性。因此采用此方法对沿黄地区经济与生态两个子系统做出综合评价。耦合度反映的是多个系统的相互依赖与制约程度,耦合协调度是对系统及要素之间良性耦合程度进行测算,是耦合与协调性的综合反映,本文用来衡量生态与经济的耦合关系。方法具体步骤如下:

#### ①数据标准化:

指标  $x_i$  为正向指标时:

$$x'_i = \frac{x_i - \min\{x_i\}}{\max\{x_i\} - \min\{x_i\}} \quad (1)$$

式中:  $x_i$  为指标的初始值。

指标  $x_i$  为负向指标时:

$$x'_i = \frac{\max\{x_i\} - x_i}{\max\{x_i\} - \min\{x_i\}} \quad (2)$$

②熵值法确定权重:计算第  $j$  项指标在第  $i$  个评价对象上的指标权重  $p_i$ :

$$p_i = \frac{x'_i}{\sum_{i=1}^n x'_i} \quad (3)$$

计算第  $j$  项指标的熵值  $e_j$ :

$$e_j = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n p_j \ln(p_j) \quad (4)$$

计算第  $j$  个指标的差异系数  $d_j$ :

$$d_j = 1 - e_j \quad (5)$$

计算第  $j$  项指标的权重  $w_j$ :

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j} \quad (6)$$

③基于熵值法测算沿黄地区经济高质量发展综合指数  $ED_i$  和生态环境保护综合指数  $EP_i$ :

$$ED_i = \sum_{j=1}^m w_j \times x'_j, EP_i = \sum_{j=1}^m w_j \times x'_j \quad (7)$$

④根据公式(1)得出经济高质量发展综合指数  $ED_i$  和生态环境保护综合指数  $EP_i$ , 可以计算出耦合度  $C$  ( $0 \leq C \leq 1$ 。  $C \leq 0.3$ , 低水平耦合;  $0.3 < C \leq 0.5$ , 拮抗状态;  $0.5 < C \leq 0.8$ , 磨合状态;  $0.8 < C \leq 1$ , 高水平耦合):

$$C = \left\{ \frac{ED \times EP}{\left( \frac{ED + EP}{2} \right)^2} \right\} \quad (8)$$

⑤计算两者的协同度  $D$  ( $0 \leq D \leq 1$ 。  $D \leq 0.3$  为低度协调;  $0.3 < D \leq 0.5$  为中度协调;  $0.5 < D \leq 1$  为高度协调)、综合评价指数  $T$ :

$$D = \sqrt{C \times T}, T = \alpha ED \times \beta EP \quad (9)$$

式中:  $\alpha$ 、 $\beta$  代表两个子系统的权重系数,综合考虑,本文取  $\alpha = \beta = 0.5$ 。

### 2.2.2 地理探测器模型

地理探测器(GeoDetector)模型是探测空间分异性,并揭示其背后驱动因子的一种统计学方法<sup>[28]</sup>,主要被用来分析各种社会和自然现象的驱动力和影响因子以及多因子交互作用。本文运用地理探测器中的因子探测模块,识别沿黄城市生态保护与高质量协调发展的驱动因素,揭示其演化机理。地理探测器的因子影响力用  $q$  值度量,其计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (10)$$

式中:  $h = 1, 2, \dots, L$ , 为因子  $X$  的分层;  $N_h$  和  $N$  分别为层  $h$  和全区的单元数;  $\sigma_h^2$  和  $\sigma^2$  是其对应的  $Y$  值的方差;  $q$  为因子的影响力值,值域为  $[0, 1]$ ,  $q$  值越大代表该因子对黄河流域不同区域耦合协调关系的解释力越强,反之则弱。

## 3 结果与分析

### 3.1 沿黄城市生态保护与经济高质量耦合协调结果分析

#### 3.1.1 生态环境保护和经济高质量发展水平时空分异特征

依据前述研究方法,测算出沿黄城市经济与生态保护综合指数(表 2),从其演变趋势来看,经济综合指数呈现波动式增长状态(图 1),由 2011 年的 0.138 6 增长到 2018 年的 0.305 8,其中 2013—2015 年有下降趋势,之后才稳步上升。从区域上来看,总体呈现东高西低的

空间格局特征，前八位主要是区域中心城市、东部中心城市和部分省会城市，且在空间上呈趋同趋势。以2018年的综合评价指数为例，排名靠前的主要有：郑州、西安、太原、济南、东营、银川、乌海、淄博。其中银川、乌海属于上游地区，西安、太原均是中游地区的省会城市，其余四地均属于黄河下游地区。上游的乌海位于前列，主要是由于乌海市能源资源十分丰富，同时还是“宁蒙陕甘”和“黄河沿岸”两个经济区的核心成员，发展潜力巨大。排名后八位的有：咸阳、渭南、天水、商洛、定西、平凉，还有山西的临汾、运城。这八个城市均属于黄河中上游地区。这一结果表明，流域下游城市经济发展水平最高，中游地区省会城市经济发展也较好，西部地区多数城市指数相对较低，由于现实和自身条件限制，有进一步提升空间。

表2 2011—2018年沿黄城市耦合协调指标

年份	经济高质量发展综合指数(ED)	生态环境保护综合指数(EP)	耦合度(C)	耦合协调度(D)	耦合阶段	耦合协调等级
2011	0.138 6	0.728 1	0.275 0	0.322 3	低水平耦合	中度协调
2012	0.267 2	0.709 7	0.561 9	0.506 1	磨合状态	高度协调
2013	0.272 4	0.710 1	0.559 2	0.507 4	磨合状态	高度协调
2014	0.236 3	0.710 6	0.520 3	0.472 4	磨合状态	中度协调
2015	0.235 5	0.728 5	0.492 6	0.462 5	拮抗状态	中度协调
2016	0.267 8	0.762 1	0.527 1	0.498 1	磨合状态	中度协调
2017	0.275 9	0.768 2	0.560 8	0.521 8	磨合状态	高度协调
2018	0.305 8	0.791 7	0.552 4	0.530 1	磨合状态	高度协调

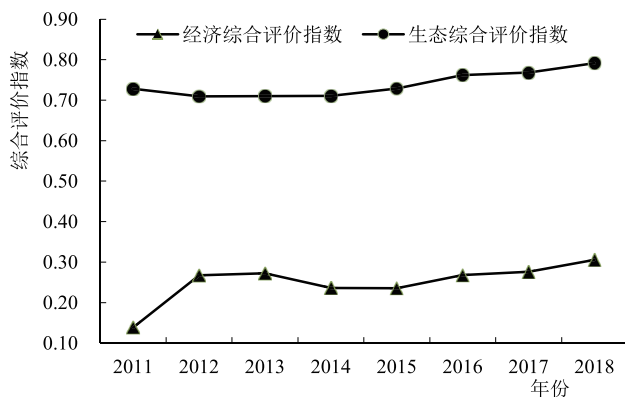


图1 经济与生态综合评价指数演变趋势图

### 3.1.2 沿黄城市耦合度的时空分异特征

总体而言，2011—2018年间，两者的耦合度呈现出先上升后下降的波动趋势(图2)，2012年是耦合度最高的年份，且大多数年份主要处于磨合状态。分年度看，2011—2012年耦合度急速上升，2011年处于一个经济周期的谷底重整时期，2012年是新的经济周期的开始年，经济综合指数增速较快，因此耦合度较高。2011年耦合度较高的地区主要分布在内蒙古和山东，总体耦合度较低，大多城市都处于低水平耦合状态。2012年低

水平耦合的城市大大减少，高水平耦合的城市从1个增加到了13个，且主要是内蒙古、山东的城市和一些省会城市。在2012年耦合度达到最高的情况下，山西和甘肃的部分城市仍一直处于低水平耦合状态，说明这两省在经济高质量发展的过程中对生态环境施加的压力过大。2012—2015年，总体耦合度有所下降，山东的济宁、泰安、滨州、聊城，河南省的洛阳、焦作等城市耦合度有所下降，从高水平耦合逐步下降到拮抗状态。2015—2016年耦合度一直处于上升状态，从17年开始耦合度又有所下降。综合所有年份来看，吕梁、濮阳、商洛、渭南，和甘肃省的天水、平凉、定西，这些城市一直处于低水平耦合状态，表明这些地区经济和生态的相互作用程度低，发展不均衡。

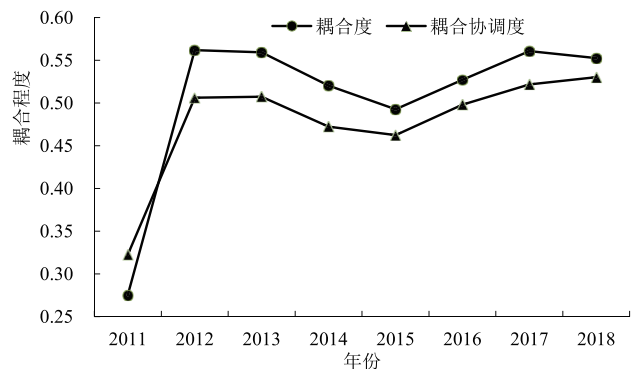


图2 经济与生态耦合度、耦合协调度演变趋势图

### 3.1.3 沿黄城市耦合协调度的时空分异特征

除了2011年耦合协调度为0.322 3之外，其余年份的耦合协调度都在0.5左右，整体上黄河流域经济高质量发展与生态环境保护的耦合协调度处于中度协调状态(图3)，耦合协调度从2015年由下降状态变为增长状态，正在向高度协调方向发展，2018年达到最高。上游和下游部分城市一直处于高度协调水平，但中游大部分是由低度协调转为高度协调状态。2011—2012年，高度协调的城市由6个增加到25个，主要集中在内蒙古和山东，还有太原、郑州、西安这些省会城市。因为这些城市的经济发展水平较高，当地政府对其生态环境保护力度也更大，再加上这些地区属于黄河流域的中心城市，其发展对黄河流域也有极大的支撑作用。2015—2018年，高度协调和中度协调的城市都有所增加，低度协调城市减少到了4个，说明黄河流域沿线城市的耦合协调水平在不断提高，经济与生态双方能够相互促进，共同发展。沿线城市中也有很多城市处于发展的停滞阶段，2011—2018年，甘肃省的天水、平凉、定西和陕西的商洛一直处于低度协调的状态，经济发展与环境承载力之间差距较大，导致耦合协调度一直处于低水平。因此，黄河流

域沿线城市耦合协调发展水平等级对应程度较弱,且存在空间上的差异性,尚未实现区域间的优质协调发展。

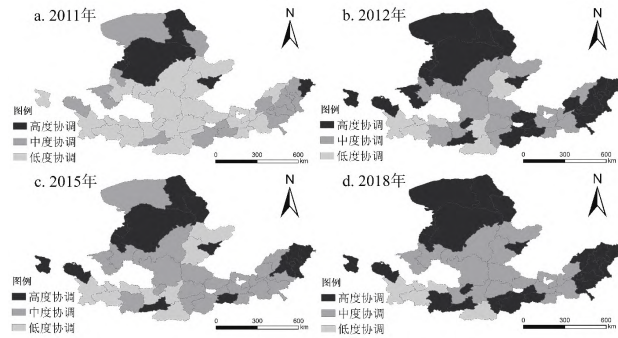


图3 沿黄城市经济与生态耦合协调度时空格局

### 3.2 沿黄城市生态保护与经济高质量协调发展的影响因素分析

#### 3.2.1 地理探测器指标选取

根据上文的测算结果,黄河流域的经济与生态耦合协调度存在地区上的差异,且受到多种因素影响。为探究不同因素对沿黄城市耦合协调水平的影响,利用地理探测器法分别对黄河流域整体、黄河上游城市和中下游城市耦合协调时空分异的形成机理进行探测分析。参考已有研究<sup>[30-32]</sup>,从贸易开放程度( $X_1$ )、经济发展水平( $X_2$ )、产业结构( $X_3$ )和科技发展水平( $X_4$ )四个维度,并结合实际情况从水资源消耗( $X_5$ )、工业废水污染度( $X_6$ )共六个维度进行因素分析(表3)。

表3 地理探测器因子分析结果

$q$ 均值	因素指标	指标说明	流域整体	上游地区	中下游地区
$X_1$	贸易开放程度	进出口总额占 GDP 的比重	0.359 2	0.484 2	0.651 0
$X_2$	经济发展水平	人均 GDP	0.681 3	0.923 5	0.633 4
$X_3$	产业结构	第二产业总产值占 GDP 的比重	0.208 5	0.665 8	0.267 7
$X_4$	科技发展水平	科技支出占 GDP 的比重	0.254 7	0.549 7	0.461 6
$X_5$	水资源消耗程度	人均居民生活用水量	0.685 5	0.863 1	0.744 1
$X_6$	工业废水污染度	工业废水排放量 / 第二产业总产值	0.191 8	0.496 9	0.284 5

#### 3.2.2 核心影响因子分析

沿黄城市生态保护与经济高质量协调发展时空分异受多个影响因子共同作用,对年均因子解释力  $q$  均值分析发现:无论是对于黄河流域整体,还是上游和中下游,经济发展水平和水资源消耗程度都是两个影响其协调发展的主要因素。说明城市经济增长是推动流域高质量发展的内在驱动因素,同时经济发展使得人们生活水平不断提高,也成为流域生态环境保护的重要推力。黄河流域的经济发展速度与质量,在我国北方经济中有至关重要的地位。经济的高质量发展涉及发展方式、发展规模、

发展速度、发展的协调性等多个方面,因此,应统筹协调各方力量,促进黄河流域的经济发展,促进耦合协调水平的提高。关于水资源消耗的因素,随着流域经济发展水平的提高与城镇化率的提高,黄河流域地区对生态用水与日常生活用水的刚性需求不断增长。要提高用水效率,保护当地水资源,提高经济发展效率与生态环境保护水平。因此,应该加大对全流域的水资源保护与利用水平,调整水资源需求的空间分布结构。以水资源的合理利用为约束,减少水资源供需矛盾,促进高质量发展。

影响上游耦合协调度的直接驱动力还有产业结构与科技发展水平,流域上游地区以传统动能为核心支撑,工业结构重化工特征明显,急需加快转变经济发展方式,加快培育新技术、新产业。科技的进步与发展不仅会促进上游产业结构改善、促进创新驱动发展,也能提高资源能源利用率。因此,上游地区应加强建设创新平台载体,增强与水资源或者生态技术相关的研发投入,提高创新产出水平,促进上游的高质量协调发展。

除了经济发展和水资源消耗程度这两个因素,贸易开放程度也是中下游地区耦合协调关系的外在驱动力。贸易开放可以吸收外来资金与技术,扩大对外开放和引进外资,提高贸易开放程度,可以使下游的经济社会生产和资本流动加快,优化产业结构、提升创新能力,有利于黄河流域的协调发展,为耦合协调发展注入强大动力。因此,黄河流域需要提高外资利用水平,提高贸易开放程度,积极融入“东西双向互济”的区域开放新格局,才能抓住更多的发展机遇,为流域的耦合协调发展贡献力量。

#### 3.2.3 不同阶段主要影响因子的作用强度与特征分析

对同一发展阶段不同分区以及不同发展阶段同一区域来说驱动力的作用方式与程度不同,呈现出流域生态保护与高质量发展的时空演变格局。(1)对黄河流域整体来说(图 4a),经济发展水平和水资源消耗程度依旧是主要因素,作用程度在 2015 年达到了最大,2015—2017 年作用程度呈下降趋势,在 2018 年由下降转为升高,并且有继续增强的趋势。贸易开放的作用程度中等,与其他两项强影响因素相反,在 2015 年作用值达到最低,但近两年也呈上升趋势,应该是新一轮高水平对外开放的良好趋势。(2)对上游地区来说(图 4b),各影响因子的作用程度差别不大,在 2016—2017 年,除了科技发展水平的作用力呈上升趋势其他因素都是下降趋势,说明在这一年间科技的发展给上游地区的协调发展注入了强大的动力。其他影响因子的作用大都

都呈上升趋势，说明近些年来上游地区的发展较为均衡，各方面共同影响，齐头并进。(3)对中下游地区来说(图4c)，各影响因子作用力较强，但波动程度较大。贸易开放程度在中下游地区影响程度要高于其他地区，所以应该利用好自身区位优势，增强全方位、高水平的对外开放。产业结构的作用程度较弱，且有持续削弱的趋势，因为中下游地区河南和山东产业结构相对合理，对中下游地区的高质量协调发展的影响波动不大。总体而言，影响因子的作用程度呈波动上升趋势，经济发展水平和水资源仍是核心影响因素，其他对于上、中下游起推动作用的直接因素或间接因素要充分利用，发挥好其协同作用，共同促进沿黄地区的高质量协调发展。

#### 4 耦合协调度预测

基于以上分析，为更好把握未来流域耦合协同发展趋势，基于GM(1, 1)灰色预测法对未来五年46个沿黄地级市的耦合协调度进行预测与分析。针对有限样本下有一定指数增长趋势的数据，GM(1, 1)灰色预测法对于中短期预测能达到较高的精度，预测步骤如下：

(1) 设原序列  $X_0 = \{x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n)\}$ ，一阶累加生成新序列  $X_1 = \{x_1(1), x_1(2), \dots, x_1(n)\}$ ，则GM(1, 1)对应的微分方程为：

$$\frac{dX_1}{dt} + \alpha X_1 = \mu \quad (11)$$

式中： $\alpha$  为发展灰数， $\mu$  为内生控制灰数， $t$  为时间变量。

(2) 设  $\hat{\alpha}$  为待估计的参数向量： $\hat{\alpha} = \begin{bmatrix} \alpha \\ \mu \end{bmatrix}$ ，利用最小二乘法进行求解， $\hat{\alpha} = (B^T B)^{-1} B^T Y$ ，求解微分方程，即可得到预测值：

$$\hat{x}_1(k+1) = [x_0(1) - \frac{\mu}{\alpha}] e^{-\alpha k} + \frac{\mu}{\alpha} \quad (k=1, 2, \dots, n-1) \quad (12)$$

(3) 对灰色预测进行精确度检验(表4)，若  $P$  (后验差比值) 和  $C$  (残差方差) 都在允许的范围之内，则可计算出该项指标的预测值。

表4 灰色预测精确度检验等级标准

精度等级	$P$	$C$	精度等级	$P$	$C$
好	$> 0.95$	$< 0.35$	勉强合格	$> 0.70$	$< 0.65$
合格	$> 0.80$	$< 0.50$	不合格	$\leq 0.70$	$\geq 0.65$

基于GM(1, 1)灰色预测模型，以2011—2018年沿黄46个地级市的耦合协调度为基础，对未来五年沿黄地区城市的耦合协调度进行预测。对预测模型进行精确度检验， $C = 0.3129$ ， $P = 1.0000$ ，说明该预测模型具有较高的精度，对原数据的拟合程度较好。由图5可知，预测结果显示2019—2023年的耦合协调度将分别达到0.5186、0.5235、0.5284、0.5333、0.5383，基本稳定

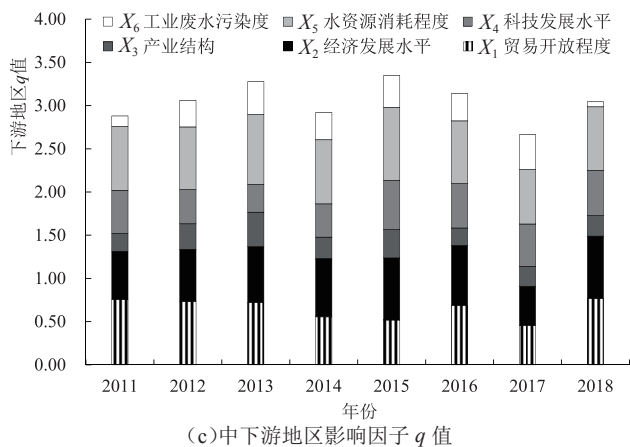
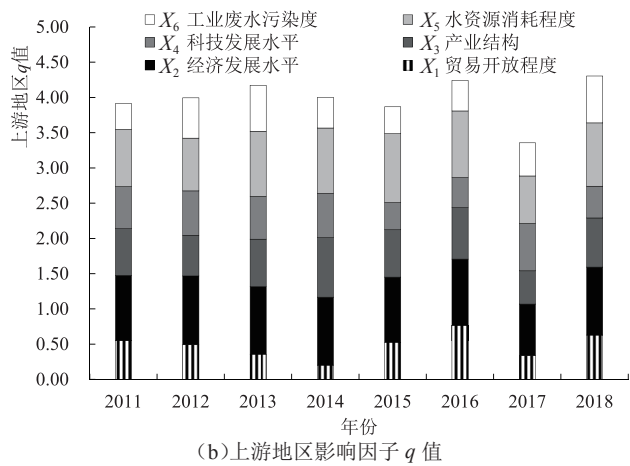
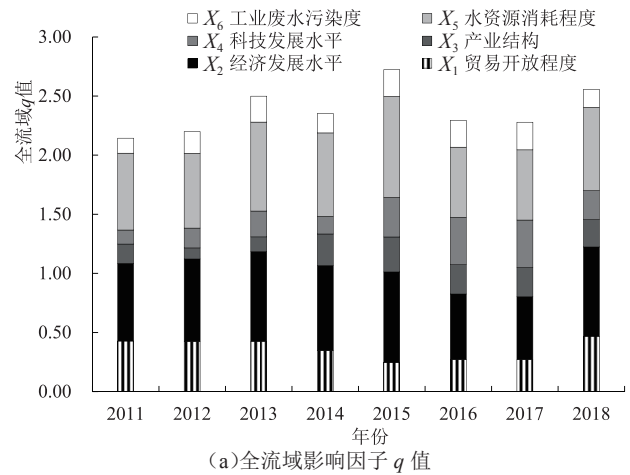


图4 不同流域各时段耦合协调发展时空分异影响因子 $q$ 值

在0.5~0.55之间。说明预测期内的协调发展水平逐年改善，但增长幅度较小，整体保持由中级协调到高级协调过渡的发展状态。随着国家对黄河生态保护的重视，以及沿黄地区的经济发展向好趋势，其耦合协调度整体上升，协同发展呈现良好演进态势。但短期内仍然无法达到全流域的全面协同发展，这就要求沿黄地区在未来发展中，要充分把握生态保护与高质量发展的阶段性特征以及时空演变规律，尽量规避与改进协调发展中的制

约因素, 加大生态保护力度, 把经济发展控制在生态环境的承载范围之内, 以实现生态保护与高质量发展协调互促、整体提升。

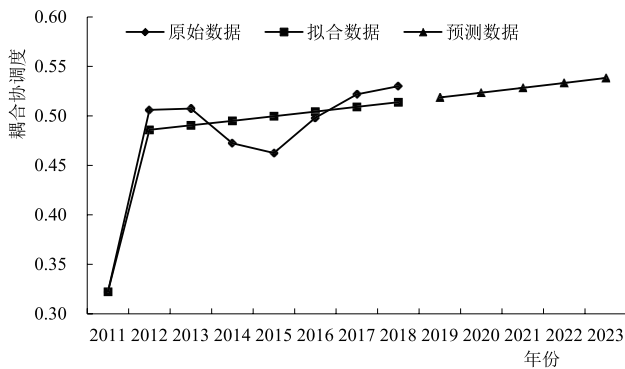


图5 沿黄地区2019—2023年耦合协调度预测

## 5 结论与建议

(1)在时间格局上, 2011—2018年黄河流域生态保护与生态高质量发展水平呈增长趋势, 在空间格局上, 下游地区生态高质量发展水平最高, 上游比较低, 而上游的生态保护水平良好, 中下游较为落后, 这与崔盼盼等的研究结果一致<sup>[27]</sup>。

(2)流域整体处于中度协调状态, 耦合协调度呈先上升后下降的趋势, 这与长江流域较为类似<sup>[33]</sup>, 两者的发展水平等级对应程度较弱, 且存在空间上的差异性, 尚未实现区域间的优质协调发展。

(3)经济发展水平和水资源是影响全流域耦合协调水平的关键因子, 其余因素在不同地区表现出一定的地域性和差异性, 产业结构与科技发展水平对于上游地区的协调发展起到推动作用, 贸易开放是中下游地区协调发展的外驱动力, 这与长三角地区较为一致<sup>[34]</sup>。

(4)从预测结果来看, 黄河流域耦合协调发展水平在短期内保持平稳上升趋势, 但总体提升与演进的速度较为缓慢, 处于中、高度协调过渡阶段, 如何更加有效推进全流域高质量发展仍需进一步研究。

黄河流域的高质量发展涉及多个方面, 需要开展多角度的协同研究, 既需要各区域内部的协同也需要整个流域城市间的整体协同, 使得区域之间互相贯通, 形成一条相互联动的生态经济带。基于上述研究结论, 具体建议如下:

第一, 针对上游和中下游采取差异化战略, 进行分区、分片、分类治理。上游地区在做好生态保护工作的同时要注重经济高质量的发展, 创新流域经济与产业联合方式, 培育生态友好型的现代产业体系。中游地区要进行水土保持和水污染综合治理, 下游地区应根据污染防治

和湿地保护来建设新的生态工程, 确保黄河防洪安全。

第二, 提高黄河流域经济与生态的发展对应程度, 建立跨区域联动协同和协调治理机制。打破各种区域壁垒, 整合集成优势资源。参考长江流域的“河长制”、协同共治模式<sup>[35]</sup>, 形成生态环境联合保护与治理的协同机制, 在统一规划建设的基础上, 完善生态保护补偿机制按地域差异进行差别施策; 推进产业协作, 建立多种形式的产业分工与合作。围绕区域优势产业, 构建产业联动机制, 共同打造城市群中的优势产业集群。

第三, 根据驱动因子发挥地区比较优势, 建立差异性空间发展规划。在黄河流域中心城市, 培育流域经济发展新动力, 对水资源进行合理配置。上游地区要提高研发投入, 注重技术创新, 积极应用先进技术促进能源、化工和原材料生产基地转型升级。将资本、技术以及资源进行集约配置, 促进三大产业融合发展。加快优化能源结构, 巩固流域能源基地的安全功能。中下游地区要加大对外开放, 加强基础设施互联互通, 充分利用外部市场与资源。☑

### 参考文献:

- [1] 习近平. 在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话[J]. 中国水利, 2019(20): 1-3.
- [2] 汪芳, 安黎哲, 党安荣, 等. 黄河流域人地耦合与可持续人居环境[J]. 地理研究, 2020(8): 1707-1724.
- [3] Grossman G M, Krueger A B. Economic growth and the environment[J]. NBER Working Papers, 1995, 110(2): 353-377.
- [4] OECD. Indicators to measure decoupling of environmental pressure from economic growth[R]. Paris: OECD, 2002.
- [5] 黄金川, 方创琳. 城市化与生态环境交互耦合机制与规律性分析[J]. 地理研究, 2003(2): 211-220.
- [6] 方创琳, 周成虎, 顾朝林, 等. 特大城市群地区城镇化与生态环境交互耦合效应解析的理论框架及技术路径[J]. 地理学报, 2016(4): 531-550.
- [7] 刘海猛, 方创琳, 李咏红. 城镇化与生态环境“耦合魔方”的基本概念及框架[J]. 地理学报, 2019(8): 1489-1507.
- [8] 樊新刚, 仲俊涛, 杨美玲, 等. 区域可持续发展能力的能值与耦合分析模型构建[J]. 地理学报, 2019(10): 2062-2077.
- [9] 刘家旗, 茹少峰. 基于生态足迹理论的黄河流域可持续发展研究[J]. 改革, 2020(9): 139-148.
- [10] 闫军印, 赵国杰. 区域矿产资源开发生态经济系统及其模拟分析[J]. 自然资源学报, 2009(8): 1334-1342.
- [11] 张智光. 林业生态安全的共生耦合测度模型与判据[J]. 中国人口·资源与环境, 2014(8): 90-99.
- [12] 邢霞, 修长百, 刘玉春. 黄河流域水资源利用效率与经济发展的耦合协调关系研究[J]. 软科学, 2020(8): 44-50.
- [13] 薛澜, 杨越, 陈玲, 等. 黄河流域生态保护和高质量发展战略立法的策略[J]. 中国人口·资源与环境, 2020(12): 1-7.
- [14] 任保平, 张倩. 黄河流域高质量发展的战略设计及其支撑体

- 系构建[J]. 改革, 2019 (10): 26-34.
- [15]杨永春, 穆焱杰, 张薇. 黄河流域高质量发展的基本条件与核心策略[J]. 资源科学, 2020 (3): 409-423.
- [16]徐勇, 王传胜. 黄河流域生态保护和高质量发展: 框架、路径与对策[J]. 中国科学院院刊, 2020 (7): 875-883.
- [17]师博, 何璐, 张文明. 黄河流域城市经济高质量发展的动态演进及趋势预测[J]. 经济问题, 2021 (1): 1-8.
- [18]宗鑫, 赵龙, 王光耀, 等. 生态补偿的复制动态及其进化稳定策略研究——以黄河流域上游青藏高原区为分析背景[J]. 干旱区资源与环境, 2016 (9): 32-37.
- [19]赵雪雁, 杜昱璇, 李花, 等. 黄河中游城镇化与生态系统服务耦合关系的时空变化[J]. 自然资源学报, 2021 (1): 131-147.
- [20]刘建华, 黄亮朝, 左其亨. 黄河下游经济—人口—资源—环境和谐发展水平评估[J]. 资源科学, 2021 (2): 412-422.
- [21]岳强, 翟鹏芳. 汾河生态保护与流域高质量发展的关联特征——基于河流沿线城市数据的实证研究[J]. 山西师大学报(社会科学版), 2021 (3): 98-106.
- [22]徐瑞璠, 刘文新, 倪琪, 等. 风险感知、政府信任与城镇居民生态补偿支付水平——基于渭河流域572户的微观实证[J]. 干旱区资源与环境, 2021 (4): 10-16.
- [23]张永凯, 孙雪梅. 黄河流域水资源利用效率测度与评价[J]. 水资源保护, 2021 (4): 37-43, 50.
- [24]宋洁. 黄河流域人口—经济—环境系统耦合协调度的评价[J]. 统计与决策, 2021 (4): 185-188.
- [25]张军扩, 侯永志, 刘培林, 等. 高质量发展的目标要求和战略路径[J]. 管理世界, 2019 (7): 1-7.
- [26]石涛. 黄河流域生态保护与经济高质量发展耦合协调度及空间网络效应[J]. 区域经济评论, 2020 (3): 25-34.
- [27]崔盼盼, 赵媛, 夏四友, 等. 黄河流域生态环境与高质量发展测度及时空耦合特征[J]. 经济地理, 2020 (5): 49-57.
- [28]王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017 (1): 116-134.
- [29]杨玉霞, 闫莉, 韩艳利, 等. 基于流域尺度的黄河水生态补偿机制[J]. 水资源保护, 2020 (6): 18-23.
- [30]赵建吉, 刘岩, 朱亚坤, 等. 黄河流域新型城镇化与生态环境耦合的时空格局及影响因素[J]. 资源科学, 2020 (1): 159-171.
- [31]郭付友, 佟连军, 仇方道, 等. 黄河流域生态经济走廊绿色发展时空分异特征与影响因素识别[J]. 地理学报, 2021 (3): 726-739.
- [32]岳立, 薛丹. 黄河流域沿线城市绿色发展效率时空演变及其影响因素[J]. 资源科学, 2020 (12): 2274-2284.
- [33]孙崇洋, 葛察忠, 段显明, 等. 长三角地区“绿水青山”与“金山银山”的耦合协调水平测度及其影响因素[J]. 环境污染与防治, 2020 (1): 79-83.
- [34]汪雅珍, 张廷海. 长三角新型城镇化与生态环境的耦合关系及其动力因素研究[J]. 河北农业大学学报(社会科学版), 2020 (3): 99-105.
- [35]王树义, 赵小姣. 长江流域生态环境协商共治模式初探[J]. 中国人口·资源与环境, 2019 (8): 31-39.

(责任编辑: 王昱)

(上接178页)

- [23]周丹萍, 王丽丽, 吕巍. 消费者采纳能效标识的整合心理模型研究[J]. 软科学, 2017 (8): 123-128.
- [24]赵锐, 周晓, 闵雪峰. 基于系统动力学的碳标签产品购买行为博弈分析[J]. 系统科学学报, 2021 (2): 111-115.
- [25]Dieu-hang T, Grafton R Q, Roberto M, et al. Household adoption of energy and water-efficient appliances: An analysis of attitudes, labelling and complementary green behaviours in selected OECD countries [J]. Journal of environmental management, 2017, 197: 140-150.
- [26]Wang Z H, Sun Q Y, Wang B, et al. Purchasing intentions of Chinese consumers on energy-efficient appliances: Is the energy efficiency label effective? [J]. Journal of Cleaner Production, 2019(238): 1-11.
- [27]商波, 黄涛珍. 可再生能源发电商最优减排补贴政策的激励效应研究[J]. 运筹与管理, 2021 (3): 151-158.
- [28]左喆瑜, 付志虎. 绿色农业补贴政策的环境效应和经济效应——基于世行贷款农业面源污染治理项目的断点回归设计[J]. 中国农村经济, 2021 (2): 106-121.
- [29]李玮, 王志浩, 刘效广. 宣传教育对城市居民垃圾分类意愿的影响机制——环境情感的中介作用及道德认同的调节作用[J]. 干旱区资源与环境, 2021 (3): 21-28.
- [30]张露, 郭晴. 低碳农产品消费行为: 影响因素与组间差异[J]. 中国人口·资源与环境, 2014 (12): 55-61.
- [31]丁志华, 姜艳玲, 王亚维. 社区环境对居民绿色消费行为意愿的影响研究[EB/OL]. [2021-04-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1593.C.20210113.1810.004.html>.
- [32]Davis F D. User acceptance of information technology: system characteristics, user perceptions and behavioral impacts [J]. International Journal of Man-Machine Studies, 1993 (38): 475-487.
- [33]Hovland C I, Janis I L, Kelley H H. Communication and persuasion [J]. Audiovisual Communication Review, 1953, 2(2): 135-142.
- [34]Ajzen I. From intentions to actions: A theory of planned behavior[M]//Kuhl J, Beckman J(Eds.). Action control: From cognition to behavior. Heidelberg: Springer, 1985.
- [35]易文燕, 项朝阳. 农产品伦理购买行为影响因素分析——基于购买意图和购买执行意图的双重中介[J]. 江汉论坛, 2020 (11): 39-46.
- [36]龙贤义, 邓新明, 杨赛凡, 等. 企业社会责任、购买意愿与购买行为——主动性人格与自我效能有调节的中介作用[J]. 系统管理学报, 2020 (4): 646-656.

(责任编辑: 王昱)